

DOI: 10.11779/CJGE2016S2006

土的介电常数模型及其工程运用探讨

廖红建¹, 孙俊煜¹, 咎月稳², 朱庆女¹, 顾飞¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 土的介电常数模型反映了介电常数和体积含水率之间的关系, 建立合理的介电常数模型, 通过探地雷达技术测定介电常数就可以预测土的含水状态。而土的含水率与其工程物理特性密切相关, 土的液塑限是划分土体工程状态的重要指标。因此, 探讨不同土体的介电常数与含水率的关系, 根据介电常数来直接判断土的软硬状态, 可为岩土工程设计提供方便途径。通过一系列不同含水率的土体的介电常数室内试验, 针对不同含砂量的黄土, 系统分析和探讨体积含水率和介电常数之间的关系。结合黄土的工程特性, 对 Topp 经验模型、扩散模型、体积混合模型, 以及根据电磁场理论推导的多项介质混合模型等介电常数模型进行适用性分析。通过试验结果分析, 建立了物理意义明确简化的土体介电常数模型, 提出了依据土体介电常数对含水率变化的敏感程度系数来划分土体类别的建议, 并通过试验进行了验证, 表明结果相符。进一步根据试验结果, 深入研究含水状态对土体工程特性的影响, 分析并给出黄土的液塑限对应的介电常数, 通过建立液性指数与介电常数的关系式, 提出了依据介电常数来划分的黄土软硬状态评价指标的建议值。

关键词: 黄土; 含砂量; 介电常数; 体积含水率

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0036-06

作者简介: 廖红建(1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土工程数值分析。E-mail: hjliao@mail.xjtu.edu.cn。

Dielectric constant model for soil and its application in engineering

LIAO Hong-jian¹, SUN Jun-yu¹, ZAN Yue-wen², ZHU Qing-nü¹, GU Fei¹

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The dielectric constant model is the relationship between dielectric constant and volumetric water content. Using proper model, the water content can be predicted by the dielectric constant from GPR. The water content of soil is closely related to its physical properties in engineering. The engineering status of soil can be classified by its liquid limit and plastic limit. Therefore, the engineering status of soil may be judged by the dielectric constant directly based on the study on different soils, which can make geotechnical design be easier. The relationship between dielectric constant and volumetric water content is discussed based on a series of loess samples with different sand contents. The applicability of several models is analyzed according to the engineering properties of loess. Moreover, a dielectric constant model, which has clear meaning and concise form, is put forward. It is suggested that the soil should be classified according to the index of sensitive rate of dielectric constant to change of moisture. The results agree with the experimental data. Furthermore, the dielectric constant of loess at liquid limit and plastic limit and the expression for liquidity index and dielectric constant are given. The method to evaluate the engineering status of soil is proposed according to the dielectric constant.

Key words: loess; sand content; dielectric constant; volumetric water content

0 引言

黄土地区地质灾害频发, 降雨、灌溉、生活污水和地下水变化严重恶化了黄土地质环境, 孕育和诱发了大量的地质灾害。因此系统检测和查明不同地质环境中黄土的含水状况, 从宏观深入探讨含水状态诱发地质灾害的内在关系具有重要的意义。应用快速无损的探地雷达技术检测含水率, 需要建立多因素影响

的黄土介电常数与含水率关系模型。

电介质在电磁波的作用下会发生极化, 介电常数就是用来表征物质材料介电性质或极化能力的量。通常用相对介电常数来表示, 即取介质的介电常数的实部与真空的介电常数的比值。在土的三相组成中, 土

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279155, 41172276)

收稿日期: 2016-05-19

体中水的介电常数处于主导地位, 同时水具有较高的介容率又有极分子会改变物质整体介电常数, 因此土体介电常数的大小主要取决于土中含水率的高低。已有的试验研究表明, 土体的介电常数和其体积含水率之间存在一定的关系, 一般来说, 体积含水率越大, 介电常数越大^[1]。

自然界土体种类繁多, 特性复杂, 决定了土体介电常数模型的复杂性。为了探索合理的土体介电常数模型, 国内外的学者进行了不少研究, 目前的介电常数模型主要有 3 类^[2]: 经验模型、扩散模型和体积混合模型。文献[3]根据极化理论推导了混合物的介电常数公式, 并将其应用到土介质中。土体含水率又与土体的力学性能和物理状态有着密切关系, 其液塑限是划分土体工程特性的重要指标。若能建立土体含水率与介电常数之间的合理的对应关系, 即土体介电常数模型, 就可通过探地雷达等手段测定介电常数, 进而确定土体的含水率; 也可以根据介电常数直接判断土体的软硬状态, 为岩土工程设计提供重要的依据。

本研究通过一系列不同含水率的土体的介电常数室内试验, 针对不同含砂量的黄土, 系统分析和探讨体积含水率和介电常数之间关系, 建立物理意义明确简化的土体介电常数模型。并根据试验结果, 深入研究含水状态对土体工程特性的影响, 分析并给出黄土的液塑限对应的介电常数, 以及依据介电常数划分黄土工程状态评价指标的建议值。

1 土体介电常数模型分析

目前常用的土体介电常数模型有经验模型 (Topp 模型)、扩散模型和体积混合模型等, 还有根据电磁场理论推导的多项介质混合模型等。

最常见的经验模型是将土体的体积含水率 θ_w 和介电常数 ε_r 关系表示成三次多项式, 即

$$\theta_w = A\varepsilon_r^3 + B\varepsilon_r^2 + C\varepsilon_r + D \quad (1)$$

式中, A, B, C, D 为待定系数, 通过数据拟合确定, 当系数不同时, 就形成了不同的介电常数模型。其中常用的有 Topp 模型^[4]:

$$\theta_w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (2)$$

可见, 经验模型的系数往往依据大量的试验数据拟合而得, 人为影响因素较大, 模型代表性较差, 且系数的物理意义不够明确^[5]。

其次, 扩散模型是根据分子扩散和极化理论, 基于扩散效应, 最早由 Maxwell Garnett 在 1904 年提出, 后来 DeLoor 扩充发展了该模型^[6], 该模型不能描述低频时混合土的介电常数, 它强调了微观下扩散颗粒与

其周围环境间的相互作用效应, 因此尽管扩散模型中各个参数物理意义比较明确, 但由于该模型只是简单地对各种介质进行混合, 没有考虑介质的电学特性, 现在已经很少应用。

体积混合模型是根据对混合介质中各组分介电常数进行体积平均的原理提出的^[7-8]。其一般形式为

$$\varepsilon_r = \sum v_i \varepsilon_{ri}^\alpha \quad (3)$$

式中, ε_{ri} 为土体中各组分的介电常数, v_i 为各组分体积占总体积的百分比, α 为取决于空间结构和相对于电场方向的参数。若将式 (3) 运用到三相介质中, 则得到了复折射率模型 (CRIM)

$$\varepsilon_r = [\theta_w \varepsilon_{rw}^\alpha + (1 - \phi) \varepsilon_{rs}^\alpha + (\phi - \theta_w) \varepsilon_{ra}^\alpha]^{1/\alpha} \quad (4)$$

式中, ϕ 为除土壤固体外的成分含量, 下标 w, s, a 分别表示水、固体、空气三相。

可见, 体积混合模型表示的是土体介电常数为土体组分按体积比例混合, 但是公式包含较多的参量, 使用的时候需要做出一定的假设。如式 (4) 在确定了土体孔隙率, 并取参数 $\alpha = 0.5$ 的前提下, 可以写出 θ 与 $\varepsilon_r^{0.5}$ 的经验公式形式, 其中比较著名的为 Alharathi 等^[9]提出的基于砂土的公式:

$$\theta_w = -0.204 + 0.128 \varepsilon_r^{0.5} \quad (5)$$

式中, 0.128 与自由水的介电常数相关, 0.204 与三相介质的介电常数和孔隙率相关。

文献[3]从介质极化理论和洛伦兹有效电场模型出发, 推导了多项介质混合的介电常数方程

$$\left(2 \sum_i A_i - 3 \right) \varepsilon_r^2 + \left(\sum_i A_i \varepsilon_{ri} + 4 \sum_i A_i + 3 \right) \varepsilon_r + 2 \sum_i A_i \varepsilon_{ri} = 0, \quad (6)$$

式中, 系数 $A_i = \frac{\varepsilon_{ri} - 1}{\varepsilon_{ri} + 2} \theta_i$, i 代表介质中各相组分。

式(6)考虑了电磁波和土中各项介质的相互作用, 因此需要知道土体中固液气各相组分的介电常数。由于黄土是干旱、半干旱气候条件下形成的特殊土, 矿物组成成分较复杂, 且以粉粒为主, 并含有一定量的粉砂和黏粒, 根据常见物质的相对介电常数值^[1], 将黄土固相的介电常数取平均值 5, 则其对应的系数为 $A_s = 0.57 \theta_s$ 。黄土的气相主要为空气, 空气的介电常数一般认为比较接近真空, 所以空气的介电常数取 1, 则黄土气相对应得系数为 $A_a = 0$ 。黄土的液相主要成分为水, 根据常见物质的相对介电常数值^[1], 室温下自由水的介电常数一般取 81, 则液相对应的系数为 $A_w = 0.964 \theta_w$, 则考虑土体固液水三相组成的介电常数计算方程为

$$(1.14 \theta_s + 1.92 \theta_w - 3) \varepsilon_r^2 + (5.15 \theta_s + 81.90 \theta_w + 3) \varepsilon_r + 5.72 \theta_s + 156 \theta_w = 0 \quad (7)$$

式中, θ_s 和 θ_w 分别为土体中固、液两相的体积百分比, $\theta_s = 1 - n$, n 为孔隙率。

2 试验研究

2.1 试验概述

为了深入探究土体介电常数模型的适用性, 将上述模型与试验进行对比分析。本研究进行了一系列不同含水率的土体介电常数试验。试验所用土样为黄土性粉质黏土, 为了探讨不同粒径级配土的介电常数模型, 将筛分土体按含砂量 (粒径大于 0.075 mm 的颗粒重量占总的颗粒的重量) 分别为 0, 20%, 40%, 60%, 80% 各配置成 10 组不同含水率的试样, 共 50 组。

首先, 测出不同含砂量下各组试样的密度 ρ 和土体的质量含水率 w 。然后利用 092SF 表面式探针的介电常数仪测出每组试样的介电常数 ϵ_r 。

通过试验测得的土体含水率为质量含水率, 然而目前在土体介电常数模型的研究中, 多用到的是土体的体积含水率, 其换算公式为

$$\theta_w = \frac{\rho_w}{(1+w)\rho_w} \quad (8)$$

2.2 试验结果与模型对比分析

本文从介质极化模型式 (6) 出发, 给出了考虑黄土的土体颗粒、空气和自由水三相组成的介电常数方程 (7)。对于多项介质混合的土体, 其为考虑孔隙率影响的二元方程。因此, 体积含水率和介电常数的关系还受土体孔隙率的影响, 要求解土体含水率或介电常数时, 应先确定土的孔隙率。

由于黄土是多孔性土, 其孔隙率较大, n 一般在 50% 以上, 且试验所制土样的孔隙率大多在 50%~60% 之间, 故取 $n=50\%$ 和 $n=60\%$ 分别代入式 (7), 得到体积含水率和介电常数的关系为

$$\theta_w = \frac{2.43\epsilon_r^2 - 5.75\epsilon_r - 2.86}{1.92\epsilon_r^2 + 81.9\epsilon_r + 156} \quad (n=50\%), \quad (9)$$

$$\theta_w = \frac{2.54\epsilon_r^2 - 5.06\epsilon_r - 2.28}{1.92\epsilon_r^2 + 81.9\epsilon_r + 156} \quad (n=60\%) \quad (10)$$

将不同含砂量下体积含水率和介电常数关系的试验结果与不同的介电常数模型式 (2)、(5)、(9)、(10) 整理于图 1 中进行分析对比。可以看出, 不同含砂量的土样与各模型之间的吻合程度各不相同。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)^[10], 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土样为砂土。本次试验中, 含砂量 60% 和 80% 的土样即为砂土, 其试验数据与 Topp 经验模型吻合程度较好, 如图 1 (b) 所示。但在含砂量较低的情况下, Topp 经验模型与试验数据有着较大的偏差, 说明 Topp 经验模型较适用

于砂土。

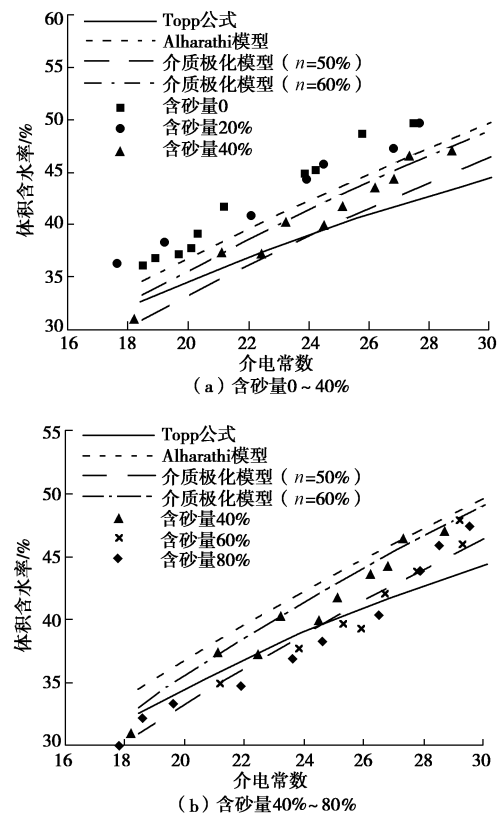


图 1 不同土样体积含水率和介电常数关系

Fig. 1 Relationship between water content and dielectric constant

与 Topp 经验模型相比, Alharathi 模型与低含砂量的试验数据更接近, 从图 1 (a) 可以看出, Alharathi 模型比较适用于含砂量介于 20%~40% 间的土体, 即黏性较强的土体。

对于介质极化模型, 由于反映了不同孔隙率的影响, 在使用的时候要确定土体的孔隙率。根据图 1, 介电常数相同时, 孔隙率越大的土体体积含水率越大。体积含水率一定时, 孔隙率越小的土介电常数越大。若取的孔隙率偏大, 则会高估体积含水率, 若取的孔隙率偏小, 则会高估介电常数。

本次试验中, 40%, 60% 和 80% 含砂量的试验数据与式 (9)、(10) 的曲线较为接近, 说明确定了孔隙率之后, 介质极化模型更适用于含砂量较高的土体。而在含砂量较小的情况下, 由式 (9)、(10) 求得的体积含水率均明显低于试验数据。这是因为该公式是基于土体中的液相均为自由水的假定下得出的, 而当土体中黏粒和粉粒含量很大时, 土体会表现出较强的黏性, 比表面积大, 此时土体中会有大量强结合水的存在^[11]。强结合水的介电常数一般小于自由水的介电常数, 因此, 在含砂量较低的时候, 会高估土体的介电常数, 从而导致运用于黏性较强的土体时求得的体积含水率偏小。

结合理论分析和试验研究, 本文对黄土地区 Topp 模型, Alharathi 模型和介质极化模型的适用性给出如下建议: ①当土体类别属于砂土时, 宜选用 Topp 模型分析体积含水率和介电常数的关系; ②当土体黏性较强, 属于粉土或黏土时, 宜选用 Alharathi 模型进行分析; ③当土体的孔隙率确定时, 宜根据介质极化模型式 (7), 进行体积含水率和介电常数关系分析。

3 建立对数经验模型

将介电常数模型运用到实际工程中, 往往要求方程尽量简单、实用且系数物理意义明确。Topp 经验公式其三次多项式虽提高了模型的准确性, 但含有较多的系数且物理含义并不明确, 也增加使用的复杂性。体积混合模型中的复折射率模型和介质极化模型均考虑了土体孔隙率的影响, 当用于土体含水率估算时, 应先确定孔隙率。Alharathi 模型是复折射率模型经验化的体现, 其形式简单, 系数也具有一定的物理意义, 但本次试验结果显示该模型较适用于黏性土。

本文根据试验结果, 借鉴国内外的学者建立介电常数的自然对数形式的模型^[12-13], 将不同含砂量试样的体积含水率与介电常数的关系整理于半对数坐标系下进行分析, 如图 2 所示。图中, 横坐标为介电常数的对数坐标, 纵坐标为体积含水率。结果显示, 在半对数坐标系下, 试验得到的介电常数和体积含水率均具有较明显的线性关系。图中实线为 40%含砂量时试验数据的线性方程。

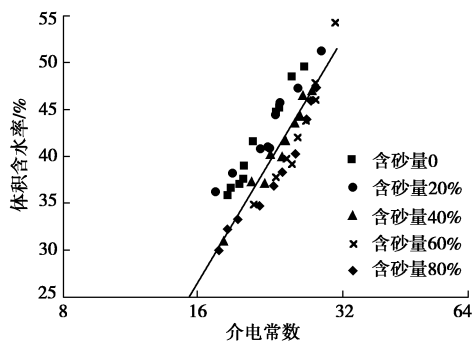


图 2 半对数坐标下体积含水率和介电常数的关系

Fig. 2 Relationship between water content and dielectric constant under semi-logarithm coordinate

于是本文提出简化的土体体积含水率和介电常数的关系为

$$\theta_w = \eta(\lg \varepsilon_r - \lg a) = \eta \lg \frac{\varepsilon_r}{a}, \quad (11)$$

式中, 系数 a 值是体积含水率为 0 时土体的介电常数, 即干土的介电常数, 一般为 3~6。系数 η 是半对数坐标下, 体积含水率和介电常数之比, 根据式 (11),

可表示为

$$\frac{1}{\eta} = \frac{d \lg \varepsilon_r}{d \theta_w} = \frac{0.43}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d \varepsilon_r}{d \theta_w} \quad (12)$$

从式 (12) 可知, η 反映单位体积含水率增量下的介电常数变化的敏感程度。斜率 η 越小, 说明在相同的体积含水率增量的情况下, 介电常数的变化率越大, 其介电常数对土的含水率变化越敏感。根据所有试验数据, 结合式 (11), 求得不同含砂量下系数 η 值如表 1 所示。可以看出, 含砂量越大, 斜率 η 值越小, 该土的介电常数对体积含水率的变化越敏感。说明斜率 η 可以反映含砂量的变化, 为区别土体类别的系数。

表 1 对数经验模型系数

Table 1 Coefficients of logarithmic model

含砂量/%	0	20	40	60	80
η	0.652	0.648	0.602	0.578	0.573

黏性土中黏粒含量较多, 由于强结合水的存在, 其介电常数对体积含水率变化的敏感程度应弱于砂土, 故黏性土的系数 η 应大于砂土, 与试验数据分析相符。根据试验数据, 探讨系数 η 进行土体类别区分, 提出如下近似划分: ①当土体属于黏性土时, η 取 0.60~0.66; ②当土体属于粉土时, η 取 0.58~0.60; ③当土体属于砂土时, η 小于 0.58。

为了验证对数经验模型的合理性, 这里采用文献 [14] 中 Q₃ 黄土的探地雷达试验数据与本文建立的模型对比分析。该土样的塑性指数约为 9, 土类确定为粉土。在图 3 半对数坐标系下, 线性回归得到该组试验数据的斜率 $\eta=0.585$, 根据本文的划分建议, 该土样就在粉土范围内, 与文献 [14] 确定的土样类别一致, 验证了本文模型和划分建议具有一定适用性。由于试验数据有限, 模型中斜率 η 的取值和划分土体类别的建议还需进一步研究。

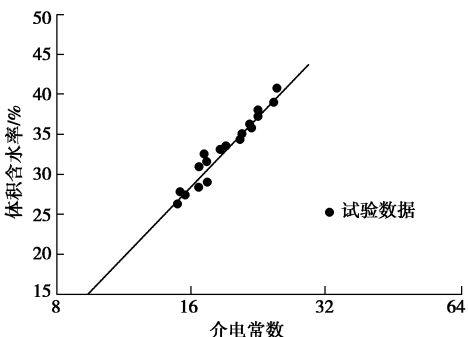


图 3 模型与 Q3 黄土试验数据对比

Fig. 3 Comparison between model and experimental data

4 黄土的工程状态划分

通常土的工程状态根据 (GB 50007—2011) 《建

筑地基基础设计规范》，按液性指数 I_L 的大小划分为坚硬、硬塑、可塑、软塑和流动 5 个状态。当土的含水率小于塑限时，则土的液性指数 I_L 小于 0，土处于坚硬状态；当土的含水率大于液限时，则液性指数 I_L 大于 1，土处于流动状态。若能建立依据土体介电常数划分黄土工程状态的标准，则可以通过探地雷达技术，有效提高工程地质勘察的效率。为此针对试验土样，进行了不同含砂量土样的液塑限测定试验，结果见表 2。

表 2 液塑限试验结果
Table 2 Results of liquid limit and plastic limit tests (%)

含砂量	0	20	40	60	80
塑限	18.4	18.64	18.79	19.08	19.49
液限	34.75	32.63	31.97	29.99	28.17

根据土样的干密度，将表 2 中的液塑限换算为体积含水率，并运用介电常数模型就可以计算土的液塑限对应的介电常数。由于黄土是以粉粒为主，并含一定比例的砂粒、黏粒的沉积物，故黄土中的含砂量一般在 20%~40%之间。根据试验结果分析和模型适用性，选用 Alharathi 模型和本文提出的对数经验模型，土体类别系数 η 取 0.6 进行计算，结果如表 3 所示。

表 3 土样液塑限的介电常数

Table 3 Dielectric constants of soil at liquid limit and plastic limit

含砂量	模型	塑限	液限
20%	Alharathi	18.06	29.39
	对数模型	18.42	32.77
40%	Alharathi	17.22	28.05
	对数模型	17.55	30.82

由表 3 的计算结果可知，黄土的塑限对应的介电常数约为 18，液限对应的介电常数约为 30。

为了划分黄土的软硬状态，需要将液性指数用介电常数来表示。根据式 (8)，将液性指数计算式换算为体积含水率的表达式，其中取纯水的密度 ρ_w 为 1 kg/cm^3 ，并假定土体的密度不变，可得

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{\frac{\theta_w}{\rho - \theta_w} - \frac{\theta_{wp}}{\rho - \theta_{wp}}}{\frac{\theta_{wL}}{\rho - \theta_{wL}} - \frac{\theta_{wp}}{\rho - \theta_{wp}}}, \quad (13)$$

式中， θ_{wp} 和 θ_{wL} 分别为土体的液塑限对应的体积含水率。

再将对数经验模型 (11) 代入式 (13)，可得液性指数和介电常数之间的关系

$$I_L = \frac{\lg \varepsilon_r - \lg \varepsilon_{rp}}{\lg \varepsilon_{rL} - \lg \varepsilon_{rp}} \cdot \frac{\rho - \eta \lg \frac{\varepsilon_{rL}}{a}}{\rho - \eta \lg \frac{\varepsilon_r}{a}}, \quad (14)$$

式中， ε_{rp} 和 ε_{rL} 分别为土体液塑限对应的介电常数。

由式 (14)，当天然含水率对应的介电常数 ε_r 接近液限对应的介电常数 ε_{rL} 时， I_L 接近 1；当天然含水率对应的介电常数 ε_r 接近塑限对应的介电常数 ε_{rp} 时， I_L 接近 0。与用液塑限表示的结果一致。

表 4 中列出了《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)，根据液性指数划分土体软硬状态的值。结合表 3 的结果，根据式 (14)，可以求得当 $I_L=0.25$ 和 0.75 时对应的土体介电常数(取整数)分别约为 20 和 27。于是本研究提出依据介电常数划分黄土软硬状态的建议值如表 4 所示。

表 4 黄土软硬状态划分

Table 4 Partition of loess states

软硬状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流动
液性指数	<0	0~0.25	0.25~0.75	0.75~1	>1
介电常数	<18	18~20	20~27	27~30	>30

5 结 论

针对土体的介电常数模型研究，本文进行了一系列的理论分析和试验研究，得出如下 4 点主要结论。

(1) 通过与黄土试验的对比分析，得出 Topp 模型较适用于砂类土，Alharathi 模型较适用于黏性土；复折射率模型和介质极化模型都需要在确定土体孔隙率后，才能建立体积含水率和介电常数的对应关系。定性的分析了孔隙率对介电常数模型影响，有关孔隙率变化时介电常数的确定有待进一步研究。

(2) 通过黄土试验结果分析，提出了形式简单物理意义明确的对数经验模型，来描述介电常数和体积含水率之间的半对数线性关系，其斜率 η 与土体类别有关，可作为划分土体类别的参数。进一步通过 Q_3 黄土试验进行验证，结果相符。

(3) 基于试验结果和建立的介电常数模型，求出黄土液塑限时的介电常数，并推导了液性指数与介电常数的关系式，给出了与规范相对应的，依据土的介电常数划分黄土软硬状态指标的建议值。

(4) 本文的研究对于基于探地雷达技术，进行土体含水状态和工程分类研究具有探索性意义。由于试验数据有限，根据体积含水率和介电常数之比 η 划分土体类别和根据介电常数划分黄土的工程状态的具体量化指标尚需进一步研究完善。

参考文献:

[1] 曾昭发, 刘四新, 冯 恒. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, FENG Heng. Principle and application of ground penetrating

- radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese))
- [2] 刘华贵, 曾 健. 土壤介电常数模型—含水率关系模型比较[J]. 土工基础, 2011, **25**(2): 58 - 61. (LIU Hua-gui, ZENG Jian. Comparison of soil dielectric constant-water content models[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, **25**(2): 58 - 61. (in Chinese))
- [3] 梁志刚, 陈云敏, 陈 赟. 利用同轴电缆电磁波反射技术测定非饱和土的含水率[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 191 - 195. (LIANG Zhi-gang, CHEN Yun-min, CHEN Yun. Measurement of water content of unsaturated soil by TDR technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 191 - 195. (in Chinese))
- [4] TOPP G C, DAVIS J L, ANNA A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resources, 1980, **16**(3): 574 - 582.
- [5] 孟美丽, 高海滨. 路面材料复合介电常数模型研究进展分析[J]. 路基工程, 2013(1): 6 - 9. (MENG Mei-li, GAO Hai-bin. Study on composite dielectric constant of pavement material[J]. Subgrade Engineering, 2013(1): 6 - 9. (in Chinese))
- [6] DE LOOR G P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water[J]. Microwave Power, 1968, **3**(2): 67 - 73.
- [7] BIRCHAK J R, GARDNER C G, HIPPEL E R, et al. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, **62**(1): 93 - 98.
- [8] LOOYENGA H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures[J]. Physica, 1965, **31**: 401 - 406.
- [9] ALHARTHI A J. Soil water saturation: dielectric determination[J]. Water Resource, 1987, **23**(4): 591 - 595.
- [10] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [11] 巨兆强. 中国几种典型土壤介电常数及其含水率的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. (JU Zhao-qiang. Dielectric permittivity and its relationship with water content for several soils in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese))
- [12] GONCHARENKO A V, LOZOVSKI V Z, VENER E F. Lichtenecker's equation: applicability and limitations[J]. Optics Communication, 2000, **174**(1/2/3/4): 19 - 32.
- [13] 李剑浩. 混合物介电常数的新公式[J]. 地球物理学报, 1989, **32**(6): 716 - 718. (LI Jian-hao. New formula of mixture's dielectric constant[J]. Acta Geophysica Sinica, 1989, **32**(6): 716 - 718. (in Chinese))
- [14] 秦佳佳. Q₃黄土介电参数与含水率、压实度关系的研究及工程应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2014. (QIN Jia-jia. Research and application for the relationship between dielectric parameters and moisture content, compactness of Q₃ loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)